

柴油机油量执行器的干扰估计滑模控制方法

孙 昊, 李世华[†]

(东南大学 自动化学院, 江苏 南京 210096; 东南大学 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 油量执行器是电控分配泵的核心部件之一, 其直接控制着柴油发动机的燃油喷射量. 模型非线性与外部扰动是油量执行器系统中不可避免的影响因素, 前期的许多研究忽略了这些非线性, 使得闭环系统性能并不理想. 本文考虑了旋转电磁铁和复位弹簧等非线性特性的建模, 得到了油量执行器系统的数学模型. 进而, 在基于模型对系统非线性进行抵消之后引入扩张状态观测器对系统外部干扰和不确定性进行估计, 设计了基于扩张状态观测器的滑模控制律. 该控制律在保证鲁棒性的同时, 可以使得切换增益幅值更小, 有利于减小滑模控制的抖振问题. 最后, 通过MATLAB/Simulink仿真和dSPACE平台实验验证了所提方法的可行性和有效性.

关键词: 油量执行器; 滑模控制; 扩张状态观测器; 柴油机

引用格式: 孙昊, 李世华. 柴油机油量执行器的干扰估计滑模控制方法. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1568 – 1576

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Sliding mode control method for diesel engine fuel quantity actuator with disturbance estimation

SUN Hao, LI Shi-hua[†]

(1. School of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;
2. Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Systems of Engineering, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Fuel quantity actuator is a core component in electronically controlled distributor pump which is used to control the fuel injection quantity for diesel engines. In the fuel quantity actuator system, there exist nonlinearities and disturbances. Previous researches usually neglect the nonlinearities and it makes the performance of the closed loop system is not ideal. Considering the modelling of nonlinear characteristics such as the rotating electromagnet and the Offsetting springs, this paper establishes the mathematical model of the fuel quantity actuator system. After canceling the system nonlinearity based on the model, an extended state observer based sliding mode control approach is presented. By using an extended state observer, the lumped disturbances and system uncertainties can be estimated asymptotically. In the proposed control law, the designed switch function gain can be selected smaller than the conventional sliding mode controller. While guaranteeing robustness, the chattering problem can be alleviated. Both feasibility and efficiency have been validated by simulations and experiments based on the dSPACE real-time control test setup.

Key words: fuel quantity actuator; sliding mode control; extended state observer; diesel engine

Citation: SUN Hao, LI Shihua. Sliding mode control method for diesel engine fuel quantity actuator with disturbance estimation. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(11): 1568 – 1576

1 引言(Introduction)

自21世纪以来, 随着汽车数量的极大增长, 能源短缺和环境污染问题愈加严峻. 为了应对全球化石能源短缺以及环境问题的日益加剧, 汽车工业持续不断地进行着能源领域的技术革新. 与此同时, 政府出台了越来越严格的排放法规, 这些都对内燃机的控制提出

了更高的要求. 柴油机作为内燃机的一种, 相较于汽油机具有扭矩大、经济性好等优点. 但柴油机由于工作压力大, 其燃油喷射系统的设计与控制具有极高的难度. 因此, 将先进的控制算法运用到柴油发动机控制中对改善柴油机的控制性能和满足排放法规的严格要求都是至关重要的.

收稿日期: 2018-05-11; 录用日期: 2018-10-11.

[†]通信作者. E-mail: lsh@seu.edu.cn; Tel.: +86 25-83793785.

本文责任编辑: 苏剑波.

国家自然科学基金项目(61473080), 江苏省“333”人才计划项目, 中央高校基本科研业务费专项资金项目(3208008602)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61473080), the“333” Talent Plan Program of Jiangsu Province and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (3208008602).

电控轴向分配喷射泵是一种位置式控制的油量喷射系统. 文献[1]首次提到这种由博世公司设计的系统. 这种分配泵保持了传统机械式分配泵的基本结构和相同的脉冲高压供油原理^[2-5]. 油量执行器是分配泵中的一个关键执行部件, 用于直接控制喷射进燃烧室的油量. 其控制喷油量的准确度直接决定着发动机的动力性能和排放性能.

油量执行器主要由3部分组成: 旋转电磁铁、霍尔传感器和发动机控制单元. 旋转电磁铁通过安装在转子上偏心球的旋转控制着分配泵柱塞上滑套的位置即供油行程, 从而控制喷油量. 霍尔传感器用于测量旋转电磁铁转子旋转的角度. 滑套位置的准确响应以及稳态波动的大小直接影响着发动机的启动、怠速、加速等性能. 所以油量执行器的控制研究对改善发动机性能至关重要.

忽略考虑到油量执行器系统的非线性特性, 文献[6]通过在线性PID控制器中引入跟踪微分器, 通过事先安排过渡过程并对输出信号进行滤波, 改善了线性PID控制器的控制效果. 但是, 油量执行器系统存在着电磁转矩及复位弹簧等非线性特性和外部干扰, 线性控制器无法有效地处理系统的非线性特性, 进而无法满足油量执行器在各种工况下的高性能要求.

近年来, 为了克服线性控制器的缺陷, 越来越多的学者将焦点转移到燃油喷射系统的非线性建模和控制问题. 文献[7]指出柴油机燃油喷射系统中的电磁执行器包含非线性和随温度时变的系统参数, 在此基础上提出了一种油量执行器模糊控制方法. 其优点在于无需控制对象的精确数学模型, 但其严重依赖于经验或专家知识. 文献[8]建立了油量执行器系统的非线性模型, 将系统非线性、未建模动态和外部干扰等作为系统不确定性来考虑. 针对模型中的线性部分设计了线性反馈控制器并通过积分处理系统参数不确定性, 针对非参数不确定性引入饱和函数形式的非线性压制项. 该控制器的优点在于可以独立处理系统线性部分的反馈设计和系统不确定性. 但是由于系统不确定性中包含了系统状态非线性项, 使得文中给出的有界假设只能局部成立, 而且将系统非线性都视为不确定性进行压制会导致饱和函数增益过大, 从而引发抖振等导致控制性能下降的其他问题.

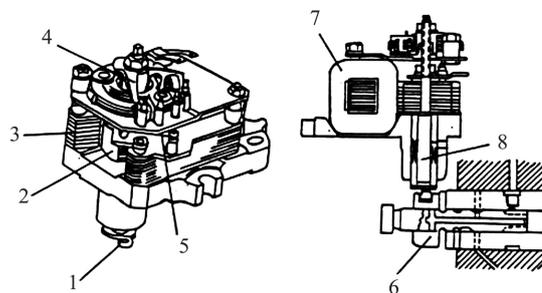
因为将系统非线性视为不确定性进行压制会存在问题, 本文考虑将系统非线性剥离, 先对油量执行器系统非线性进行建模、抵消, 再结合滑模反馈控制律, 最后将不确定性和外部干扰作为系统集总干扰, 引入扩张状态观测器对集总干扰进行估计补偿以减小滑模控制的抖振问题. 其中滑模控制作为一种干扰压制的控制策略因其对非线性系统的良好控制性能^[9], 在直流-直流降压变换器^[10]、汽车电子节气门^[11]、永磁

同步电机^[12]等众多领域得到应用. 但是滑模控制的切换增益过大容易导致油量执行器高频抖振. 同时, 干扰估计前馈补偿控制策略的研究同样受到关注. 文献[13-15]说明了干扰估计补偿方法能有效地估计外部干扰、系统不确定性、未建模动态等. 文献[16]提出了自抗扰控制方法, 将作用于被控对象的所有不确定因素作用都归结为“未知扰动”并用扩张状态观测器对干扰进行估计补偿. 此外, 扩张状态观测器在实际系统中也得到了广泛的应用, 例如永磁同步电机^[17]、感应电机^[18]、电液系统^[19]、汽油发动机^[20]、导弹制导^[21]、航天器姿态^[22]和电磁线性执行器^[23]等. 但是将系统所有不确定性都作为集总干扰进行估计会增加观测器的负担, 且当集总干扰中包含系统状态非线性项时, 扩张状态观测器无法精确估计得到集总干扰.

本文首先建立了油量执行器的数学模型, 然后根据油量执行器数学模型设计扩张状态观测器来估计系统中的集总干扰, 接着设计了基于扩张状态观测器的滑模控制律. 本文所提控制律同时考虑了非线性建模补偿和干扰估计补偿, 进一步减小了系统非线性特性的影响, 并且在保证鲁棒性的同时, 可以使得切换增益幅值更小, 有利于减小滑模控制的抖振问题. 最后通过MATLAB/Simulink仿真和dSPACE平台实验进一步验证了所设计控制器的可行性和有效性.

2 油量执行器建模(Modelling of fuel quantity actuator)

油量执行器作为电控分配泵中的一个关键性部件, 对发动机喷油量的调节起主要作用. 如图1所示, 油量执行器的主要组成部分有偏心球、转子、定子、角度传感器、复位弹簧、溢油环、线圈和轴等. 油量执行器本身是一个高度非线性的系统, 主要包括复位弹簧转矩非线性和旋转电磁铁的电磁转矩非线性. 一般记弹簧转矩为 $T_{sp}(\theta)$, 电磁转矩为 $T_e(i, \theta)$.



1—偏心球 2—转子 3—定子 4—半差动角度传感器
5—复位弹簧 6—溢油环 7—线圈 8—轴

图 1 油量执行器结构图

Fig. 1 Structure of fuel quantity actuator

2.1 非线性(Nonlinearities)

1) 复位弹簧: 油量执行器的结构中含有两根线性弹簧, 但在正常工作过程中, 随着电磁铁转子的旋转,

弹簧拉力的切向分力产生的转矩实际上和旋转角度呈非线性的关系. 复位弹簧顾名思义具有使系统复位的作用, 当电源被切断时, 电磁转矩会逐渐减小直至消失, 这时电磁转矩不足以维持与弹簧转矩的平衡, 复位弹簧的弹簧转矩迫使转子回归初始最小位置. 与此同时, 柴油机的燃油供给逐渐减小直至被切断, 从而保证柴油机在遇到故障时, 能快速切断供油, 迫使柴油机停止工作. 此外, 转子的旋转被限制在一个设定的最大角度和最小角度之间. 复位弹簧的物理结构示意图如图2(a)和图2(b)所示.

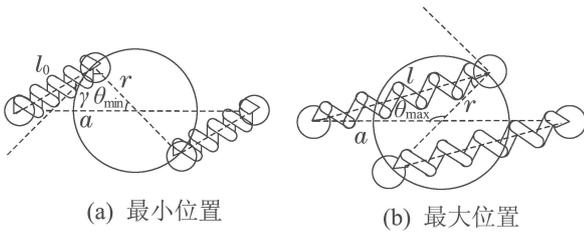


图2 复位弹簧物理结构示意图

Fig. 2 The physical structure diagram of offsetting springs

图2(a)中, 角度 θ 处在最小值的位置; 图2(b)中, 角度 θ 处于最大值的位置. 每根弹簧固定在两个点上, 一端固定于转子边缘, 另一端固定在定子上. 当转子沿着顺时针方向转动时, 弹簧转矩会随之增大, 方向与转动方向相反. 图2中虚线所示的三角形中, 弹簧定子端到转子圆心的边与转动半径的边所夹的角 θ 变化的范围从 θ_{\min} 到 θ_{\max} , 其中 $\theta_{\max} = \theta_{\min} + 60^\circ$, 则实际旋转角 $\theta \in [0, 60^\circ]$. 此外, 复位弹簧的初始长度为 l_0 , 可以得到 θ_{\min} 如下:

$$\theta_{\min} = \arccos\left(\frac{r^2 + a^2 - l_0^2}{2ra}\right),$$

其中: a 为弹簧定子端到转子圆心的距离, r 为转动半径. 复位弹簧长度与旋转角之间的关系式可以表示为 $l = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ra \cos(\theta + \theta_{\min})}$. 接着, 可以得到切向的弹簧转矩.

$$T_{sp}(\theta) = 2r(k(l - l_0) + k_0) \cdot \cos\left(\arcsin\left(\frac{a}{l} \sin(\theta + \theta_{\min})\right) - \frac{\pi}{2}\right), \quad (1)$$

其中: k 为弹簧的弹性系数, k_0 为弹簧初始张力.

如图3所示通过多项式拟合, 式(1)可以被简化成如下形式:

$$T_{sp}(\theta) = c_2\theta^2 + c_1\theta + c_0, \quad (2)$$

其中 c_0, c_1 和 c_2 均为常数.

2) 旋转电磁铁: 在油量执行器系统中, 旋转电磁铁是一个重要的组成部分. 旋转电磁铁作为油量执行器中的驱动部件, 其通电后产生的电磁转矩提供转子顺时针旋转运动所需的正向转矩. 旋转电磁铁的工作

原理如图4所示, 当线圈通电时, 磁力线总是试图沿着磁阻最小的路径闭合, 因此整个电磁转矩作用的方向总是沿着使衔铁运动到整个磁路内磁阻最小位置的方向. 当旋转电磁铁的电磁转矩与复位弹簧所产生的阻力矩达到平衡时, 则电磁铁转动到该位置固定不动.

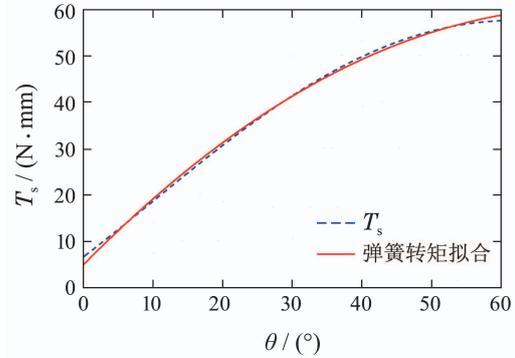


图3 非线性弹簧转矩拟合曲线图

Fig. 3 Fitting curve of nonlinear spring torque

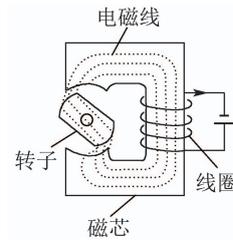


图4 旋转电磁铁

Fig. 4 Rotary electromagnet

由于结构的特殊性, 在没有特殊测量装置的情况下无法直接测量得到电磁转矩. 所以本文通过拟合的方法间接地建立了电磁转矩的关系式. 如果转子匀速转动, 则转矩平衡方程可以写成 $T_{sp} = T_e$.

如图5所示, 通过线性拟合的方法可以用一个平面去逼近电磁转矩 T_e 与线圈电流 i , 旋转角 θ 三者之间的函数关系, 得到电磁转矩的表达式如下:

$$T_e(i, \theta) = a_2i + a_1\theta + a_0, \quad (3)$$

其中 a_2, a_1 和 a_0 均为常数.

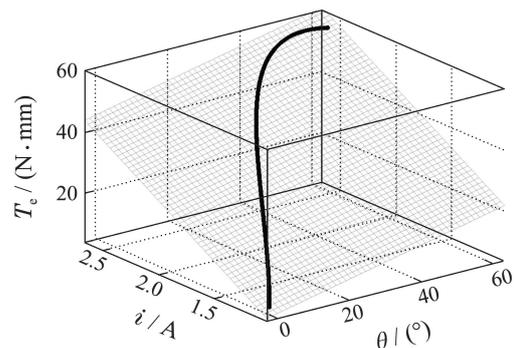


图5 电磁转矩拟合图

Fig. 5 Fitting diagram of electromagnetic torque

2.2 数学建模(Mathematical modelling)

首先, 为了给出系统模型, 令转子角速度为 ω . 考虑非线性弹簧转矩和电磁转矩, 油量执行器的动态方程表达如下:

$$J\dot{\omega} = T_e - T_{sp}, \quad (4)$$

其中 J 为转动惯量.

由于旋转角的最大最小位置的限制, $J\dot{\omega}$ 在 θ_{\min} 时非负, 在 θ_{\max} 时非正. 因此, 同时考虑线圈电动态, 外部干扰 d_e 和系统输入电压波动, 可以给出如下的油量执行器系统状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega, \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J}(a_2 i - c_2 \theta^2 + (a_1 - c_1)\theta + a_0 - c_0) + d_e, \\ \dot{i} = \frac{1}{L}(V_{in0}\mu - Ri - C_e\omega) + \frac{1}{L}((V_{in} - V_{in0})\mu), \end{cases} \quad (5)$$

其中: V_{in0} 为电源电压标称值, V_{in} 为电源电压实际值, C_e 为反电动势常数, L, R 分别为线圈电感和线圈电阻.

注 1 本文主要考虑了油量执行器系统中主要的两种干扰, 一是由分配泵柱塞与滑套之间相对运动所产生的摩擦转矩对油量执行器偏心球角度的外部干扰 d_e , 二是实际工况中常见的汽车蓄电池电压波动 $\Delta V_{in} = V_{in} - V_{in0}$ 造成的系统输入电压不确定性. 在正常工况中电源电压即蓄电池电压 V_{in} 的变化是有界的, 此外, 由柱塞与滑套相对运动产生的摩擦转矩对偏心球的影响 d_e 在实际中也是有界的.

2.3 问题描述(Problem formulation)

由于在该系统中没有电流传感器, 无法直接测量得到线圈电流, 因此要完整描述旋转电磁铁的动态, 就必须涉及到对线圈电流的估计. 但是由于旋转电磁铁的电流动态的时间常数相较于采样周期较小, 可以忽略电动态. 考虑将外部干扰和系统不确定性作为

集总干扰并令 $x = [x_1 \ x_2]^T = [\theta \ \omega]^T$, 那么系统动态模型(5)可以改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 - \frac{c_2}{J}x_1^2 + c + b\mu + d, \end{cases} \quad (6)$$

其中: $d = \frac{a_2(V_{in} - V_{in0})\mu}{JR} + d_e$ 为系统集总干扰, μ 为控制量占空比,

$$\begin{aligned} a_{21} &= \frac{a_1 - c_1}{J}, \quad a_{22} = \frac{-a_2 C_e}{JR}, \\ c &= \frac{a_0 - c_0}{J}, \quad b = \frac{a_2 V_{in0}}{JR}. \end{aligned}$$

3 复合控制器设计 (Composite controller design)

3.1 控制设计(Control design)

基于油量执行器的数学模型(6), 针对干扰 d 的扩张状态观测器可以设计为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + a_{21}x_1 + a_{22}x_2 - \frac{c_2}{J}x_1^2 + c + b\mu + p_1(x_2 - z_1), \\ \dot{z}_2 = p_2(x_2 - z_1), \end{cases} \quad (7)$$

其中: $z_1 = \hat{x}_2$ 是状态估计, $z_2 = \hat{d}$ 是干扰估计, p_1, p_2 为增益. 令 $e = x_1 - x_{1ref}$, 针对油量执行器系统设计如式(8)所示的滑模面:

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e = x_2 + \lambda x_1 - \dot{x}_{1ref} - \lambda x_{1ref}, \quad (8)$$

其中: $\lambda > 0$ 为控制参数, x_{1ref} 是目标角度.

本文提出的基于扩张状态观测器的滑模控制方法如图6所示, 其控制律设计如下:

$$\begin{aligned} \mu &= -\frac{1}{b}(\lambda x_2 - \lambda \dot{x}_{1ref} - \ddot{x}_{1ref} + k_1 \text{sgn } \sigma) - \\ &\frac{1}{b}(a_{21}x_1 + a_{22}x_2 - \frac{c_2}{J}x_1^2 + c + \hat{d}), \end{aligned} \quad (9)$$

其中 k_1 是切换增益.

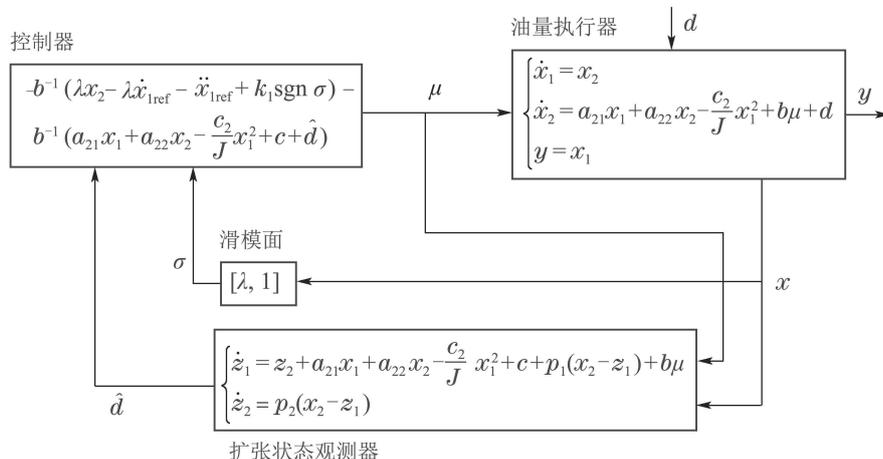


图 6 基于扩张状态观测器的油量执行器滑模控制方法框图

Fig. 6 Block diagram of the proposed extended state observer based sliding mode control method for fuel quantity actuator

3.2 稳定性分析(Stability analysis)

为了分析系统的稳定性, 首先给出相关的概念和引理. 考虑系统^[24]

$$\dot{x} = f(t, x, u), \quad (10)$$

其中 $f: [0, \infty) \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ 是关于 t 的分段连续函数、关于 x 和 u 的局部利普希茨函数. 输入 $u(t)$ 对于所有 $t \geq 0$ 是 t 的分段连续有界函数.

定义 1^[24] 如果存在一个 \mathcal{KL} 类函数 β 和一个 \mathcal{K} 类函数 γ , 使对于任何初始时间 t_0 、初始状态 $x(t_0)$ 和有界输入 $u(t)$, 解 $x(t)$ 对于所有 $t \geq t_0$ 都存在, 且满足

$$\|x(t)\| \leq \beta(\|x(t_0)\|, t - t_0) + \gamma\left(\sup_{t_0 \leq \tau \leq t} \|u(\tau)\|\right),$$

那么系统(10)是输入-状态稳定的.

引理 1^[24] 设 $V: [0, \infty) \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 是连续可微函数, 满足

$$\alpha_1(\|x\|) \leq V(t, x) \leq \alpha_2(\|x\|),$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(t, x, u) \leq -W_3(x),$$

$$\forall \|x\| \geq \rho(\|u\|) > 0,$$

$\forall (t, x, u) \in [0, \infty) \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, 其中 ρ 是 \mathcal{K} 类函数, α_1 和 α_2 是 \mathcal{K}_∞ 类函数, $W_3(x)$ 是 \mathbb{R}^n 上的连续正定函数. 则系统(10)是输入-状态稳定的.

引理 2^[24] 考虑非线性系统 $\dot{x} = F(x, w)$, 如果该系统是输入-状态稳定的, 则当输入满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} w(t) = 0$ 时, 系统状态 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$.

假设 1 系统(6)中干扰的导数有界且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{d}(t) = 0$.

在油量执行器系统中, 观测器误差定义为

$$\begin{cases} e_{z_1} = x_2 - z_1, \\ e_d = d - z_2. \end{cases} \quad (11)$$

假设 2 式(11)中的干扰估计误差 e_d 有界且定义干扰估计误差的界为 $e_d^* = \sup_{t>0} |e_d(t)|$.

有了上述的铺垫, 这里给出本文的主要结论:

定理 1 当系统(6)满足假设1时, 如果扩张状态观测器误差动态系统矩阵 $-\mathbf{A}_e$ 是 Hurwitz 矩阵, 那么观测器是渐近稳定的.

证 令 $e_z = [e_{z_1} \ e_d]^T$ 并对其求导, 则观测器误差动态可以写成如下形式:

$$\dot{e}_z = -\mathbf{A}_e e_z + \dot{d}, \quad (12)$$

其中 $\dot{d} = [0 \ \dot{d}]^T$, $-\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} -p_1 & 1 \\ -p_2 & 0 \end{bmatrix}$.

通过选取合适的观测器增益参数 p_1 和 p_2 , 使得

$-\mathbf{A}_e$ 是 Hurwitz 矩阵.

选取如下形式的李雅普诺夫函数:

$$V_z = \frac{1}{2} e_z^T e_z. \quad (13)$$

式(13)中的 V_z 函数求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_z &= -e_z^T \mathbf{A}_e e_z + e_z^T \dot{d} = \\ &= -(1 - \xi) e_z^T \mathbf{A}_e e_z - \xi e_z^T \mathbf{A}_e e_z + e_z^T \dot{d} \leq \\ &= -(1 - \xi) e_z^T \mathbf{A}_e e_z - \xi e_z^T \lambda_{\min}(\mathbf{A}_e) e_z + e_z^T \dot{d}, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $0 < \xi < 1$.

当满足条件 $\|e_z\| \geq \rho \|\dot{d}\|$ 且 $\rho = \frac{1}{\lambda_{\min}(\mathbf{A}_e) \xi}$ 时,

$$\dot{V}_z \leq -(1 - \xi) e_z^T \mathbf{A}_e e_z. \quad (15)$$

由引理1, $(1 - \xi) e_z^T \mathbf{A}_e e_z$ 是连续正定函数, $\forall \|e_z\| \geq \rho \|\dot{d}\| > 0$ 且 $\dot{V}_z \leq -(1 - \xi) e_z^T \mathbf{A}_e e_z$, 可推得观测器误差动态系统(12)是输入-状态稳定的. 当满足假设1时, 根据引理2可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_z = 0, \quad (16)$$

即观测器误差动态是渐近稳定的. 证毕.

定理 2 当系统(6)满足假设1和假设2时, 如果式(9)中的切换函数增益 $k_1 > e_d^*$, 那么系统(6)在观测器(7)和控制律(9)下的系统输出跟踪误差能够沿着滑模面渐近收敛到零.

证 考虑系统(6), 对设计的滑模面(8)求导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= a_{21} x_1 + a_{22} x_2 - \frac{c_2}{J} x_1^2 + c + d + \\ &= b\mu + \lambda x_2 - \ddot{x}_{1\text{ref}} - \lambda \dot{x}_{1\text{ref}}. \end{aligned} \quad (17)$$

将控制律(9)代入式(17), 得到

$$\dot{\sigma} = -k_1 \text{sgn} \sigma + d - \hat{d}. \quad (18)$$

选取如下形式的李雅普诺夫函数:

$$V(\sigma) = \frac{\sigma^2}{2}. \quad (19)$$

式(19)中的 $V(\sigma)$ 函数关于 σ 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \sigma \dot{\sigma} = \sigma(-k_1 \text{sgn} \sigma + d - \hat{d}) \leq \\ &= |\sigma|(-k_1 + e_d^*) = \\ &= -\sqrt{2}(k_1 - e_d^*) V^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (20)$$

满足假设2且给定 $k_1 > e_d^*$ 时, 可令 $\xi = k - e_d^*$, 则式(20)可以写为

$$\dot{V} \leq -\sqrt{2} \xi V^{\frac{1}{2}}. \quad (21)$$

对上式积分可得

$$V^{\frac{1}{2}}(t) \leq -\frac{\sqrt{2}}{2} \xi t + V^{\frac{1}{2}}(0). \quad (22)$$

所以, $V(t)$ 能够在有限时间 t_r 到零,

$$t_r \leq \frac{2V^{\frac{1}{2}}(0)}{\xi}. \quad (23)$$

因此, 式(9)所给控制律能够满足式(20), 系统状态能够在有限时间内到达给定的滑模面 $\sigma = 0$. 当到达滑模面 $\sigma = 0$ 时, 可得

$$\dot{e} = -\lambda e. \quad (24)$$

选取 $\lambda > 0$ 可以得到闭环系统系统输出跟踪误差满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$. 这表示了在本文提出的控制方法下, 系统输出跟踪误差能够沿着滑模面渐近地到达平衡点. 证毕.

4 仿真与实验(Simulations and experiments)

本节将滑模控制方法作为参照, 通过仿真和实验结果来验证文中提出的控制算法在油量执行器系统中的控制性能. 与控制律(9)的设计类似, 在不引入干扰估计补偿时, 滑模控制律退化为如下形式:

$$\mu = -\frac{1}{b}(\lambda x_2 - \lambda \dot{x}_{1ref} - \ddot{x}_{1ref} + k \operatorname{sgn} \sigma) - \frac{1}{b}(a_{21}x_1 + a_{22}x_2 - \frac{c_2}{J}x_1^2 + c), \quad (25)$$

其中: k 是切换增益, σ 是设计的滑模面.

在本文考虑的油量执行器系统状态方程(5)中的一些参数名称及其标称值在表1中给出.

表 1 油量执行器参数

Table 1 Parameters of the fuel quantity actuator

参数	符号	标称值
输入电压	V_{in}	12 V
参考角度	θ_{ref}	0.5 rad
电阻	R	0.75 Ω

表2给出了式(6)中的其他参数.

表 2 简化模型参数

Table 2 Parameters values for simplified model

参数名	参数值
a_{21}	-7.1121×10^3
a_{22}	-41.6290
c_2	-36.1109
c	-2.3370×10^3
b	3.7872×10^4

注 2 为了保证闭环系统稳定性, 滑模控制和基于扩张状态观测的滑模控制的切换函数增益设计应该分别满足 $k > |d|$ 和 $k_1 > |d - \hat{d}|$. 由于扩张状态观测器能够精确地估计干扰, 估计误差 $|d - \hat{d}|$ 的幅值能够趋近于 0, 这就使得其幅值能够远小于 $|d|$ 的幅值. 至此, 本文所提方法的切换函数增益与滑模控制方法相比可以小许多, 这就在某种程度上抑制了滑模控制的抖振问题.

4.1 仿真结果(Simulation results)

本小节将通过仿真揭示本文提出的基于扩张状态观测器的滑模控制策略在抑制干扰和减小抖振方面的优点. 为了在系统动态响应, 干扰抑制和稳态波动等性能指标之间保持一个合适的平衡, 文中选择了较为合适的控制器参数, $\lambda = 100$, 其他参数如表3所示.

表 3 控制器参数

Table 3 Control parameters

控制器	控制参数值
SMC	$k = 1000$
SMC + ESO	$k_1 = 500, p_1 = 600, p_2 = 9 \times 10^4$

为了验证本文所提控制器的跟踪性能, 给出两组跟踪变化信号的仿真对比. 两组仿真分别给定目标位置角度为 $x_{1ref} = 0.5 + 0.1 \sin(2t)$ (rad) 和 $x_{1ref} = 0.5 + 0.1 \sin(10t)$ (rad), 仿真步长设置为 $T = 0.1$ ms. 图7-9分别为 $x_{1ref} = 0.5 + 0.1 \sin(2t)$ (rad) 时, 位置角度跟踪响应曲线、跟踪误差曲线和占空比曲线. 图10-12分别为 $x_{1ref} = 0.5 + 0.1 \sin(10t)$ (rad) 时, 位置角度跟踪响应曲线、跟踪误差曲线和占空比曲线.

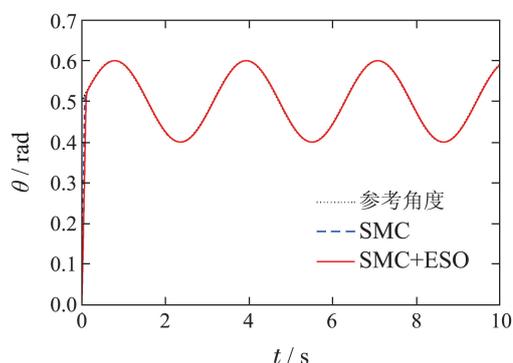


图 7 位置角度跟踪响应曲线

Fig. 7 Response curves of position angle tracking

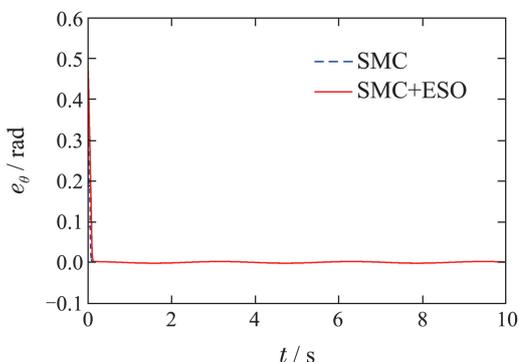


图 8 位置角度跟踪误差曲线

Fig. 8 Curves of position angle tracking error

从图7-12两组仿真曲线中可以看出由于切换函数增益选取较小, SMC + ESO方法在初始动态过程会

稍慢于SMC方法,但两者的稳态跟踪精度几乎一致,且SMC + ESO的控制量抖振明显小于SMC方法.

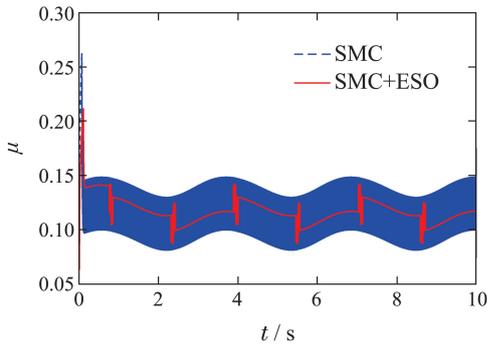


图9 控制输入
Fig. 9 Control inputs

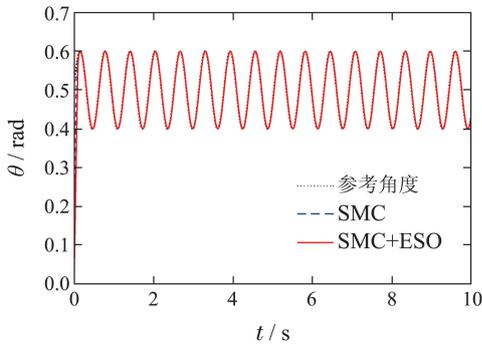


图10 位置角度跟踪响应曲线
Fig. 10 Response curves of position angle tracking

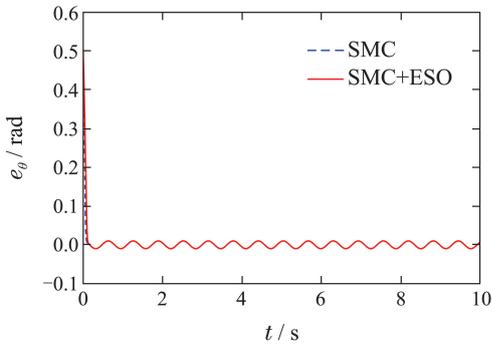


图11 位置角度跟踪误差曲线
Fig. 11 Curves of position angle tracking error

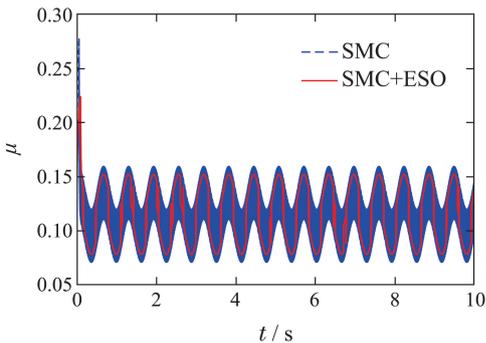


图12 控制输入
Fig. 12 Control inputs

此外,为了验证本文提出的控制器的抗干扰性能,在仿真中给定目标位置角度为0.5 rad,并在仿真时间 $t = 0.4$ s时加入了一个等效转矩为 10 (N · mm)的突加外部干扰.图13中的曲线分别为在滑模控制和在基于扩张状态观测器的滑模控制下的系统相轨迹图.图14和图15分别为位置角度跟踪响应曲线和角速度响应曲线.图16和图17分别为相应的控制输入占空比的曲线和干扰估计曲线.

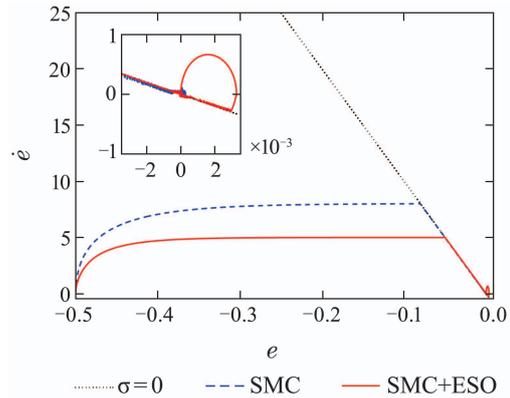


图13 相轨迹图
Fig. 13 Phase trajectories

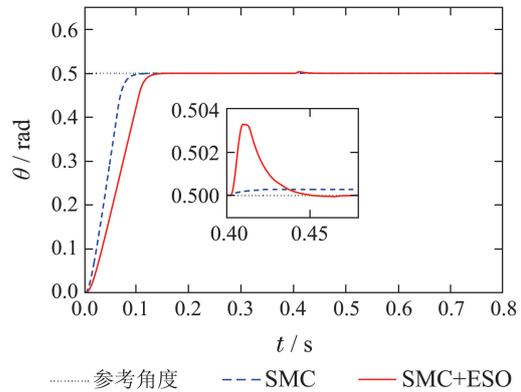


图14 位置角度跟踪响应曲线
Fig. 14 Response curves of position angle tracking

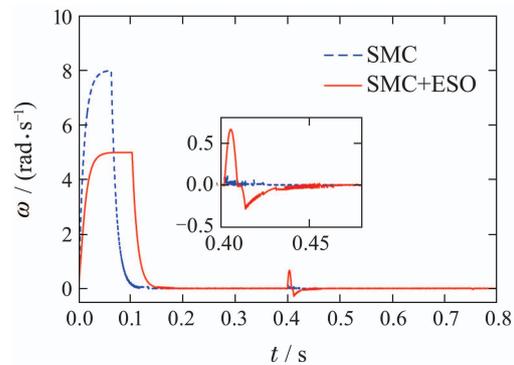


图15 角速度响应曲线
Fig. 15 Response curves of angular velocity

图13的相轨迹显示两种方法的 σ 都能够在有限时间到达滑模面 $\sigma = 0$, 并且系统状态跟踪误差 e 和 \dot{e} 沿

着滑模面渐近收敛到零. 从图14和图15中可以看出在两种控制器控制下的系统状态在跟踪阶跃信号时有着近乎相同的响应性能. 而且在 $t = 0.4\text{s}$ 突加阶跃扰动时, 本文提出的控制方法也展现出良好的抗干扰性能. 从图16控制输入曲线中可以看出本文所提方法的控制量波动远小于滑模控制方法. 从图17干扰估计曲线可以看出扩张状态观测器能快速准确地估计干扰.

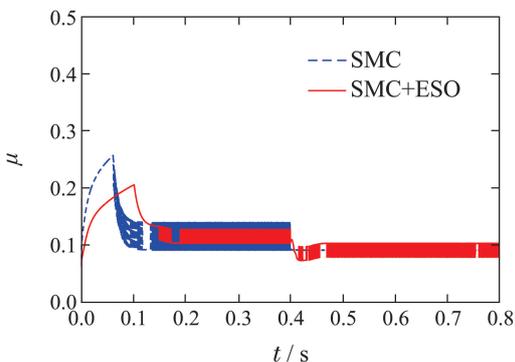


图 16 控制输入

Fig. 16 Control inputs

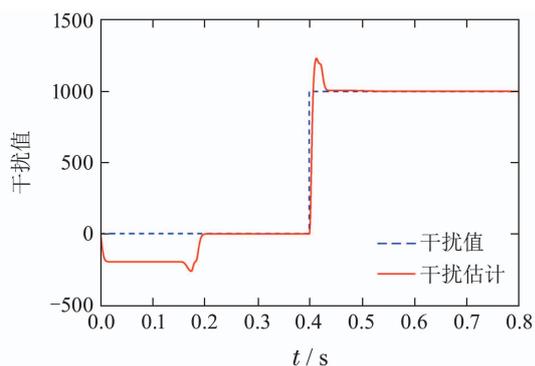


图 17 干扰估计

Fig. 17 Disturbance estimation

注 3 本文的仿真与实验主要验证所提控制方法在减小抖振的同时能够保持良好的抗干扰性能. SMC + ESO方法切换函数增益取值只有所给集总干扰的一半, 切换函数项不能完全抑制所给干扰, 同时ESO用于估计干扰会有动态过程, 因此在加入扰动的瞬间会有出现微小的超调.

4.2 实验平台(Experimental platform)

图18中所示的油量执行器实验平台由油量执行器、dSPACE DS1104实时控制器、直流电压源等组成. 控制算法通过MATLAB/Simulink编程实现, 控制周期和采样周期均设置为0.1 ms. 旋转角度通过霍尔传感器进行测量, 通过 16 位模数转换器将信号传输到 dSPACE 平台.

实际工况中, 蓄电池电压的波动以及外部转矩的干扰会对油量执行器系统的控制性能造成影响, 这将直接影响喷油量的准确性, 进而造成发动机转速波动过大. 尤其是当柴油发动机刚启动时发电机还未工作,

所有电气负载都由蓄电池提供能量, 这会导致蓄电池电压突变, 进而致使供油量偏离目标值, 当供油过多时会导致启动烟度过高, 而当供油不足时会导致启动过慢甚至无法启动. 由于实验条件的限制无法精确控制外加转矩干扰, 所以本文所提出控制方法的抗干扰性能实验仅验证了加入了电源电压波动的情况.

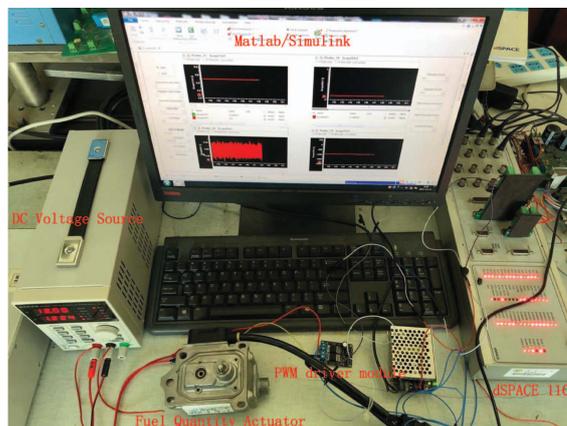


图 18 实验平台

Fig. 18 Experimental platform

4.3 实验结果(Experimental results)

本小节将通过实验验证本文所提方法的抑制干扰和减小抖振的能力. 给定目标位置角度为0.5 rad, 并在 $t = 1\text{s}$ 时突加电源电压扰动 $V_{in} : 12\text{V} \rightarrow 13\text{V}$. 电源电压变化如下:

$$V_{in} = \begin{cases} 12\text{V}, & t \in [0, 1)\text{s}, \\ 13\text{V}, & t \in [1, 2)\text{s}. \end{cases} \quad (26)$$

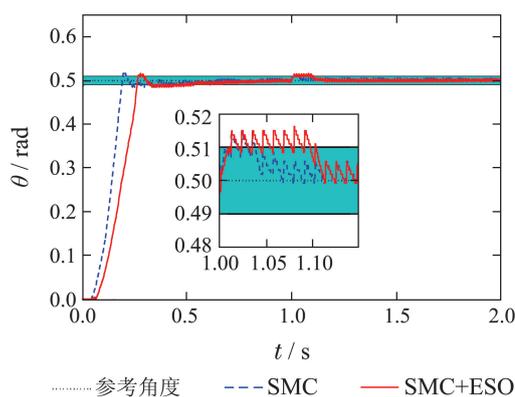


图 19 位置角度跟踪响应曲线

Fig. 19 Response curves of position angle tracking

本小节实验中的控制器参数与仿真保持一致. 由图19可以看出在所提控制器切换函数增益仅为滑模控制器一半的情况下, 基于扩张状态观测器的滑模控制器的动态性能略逊于滑模控制器. 但是在 $t = 1\text{s}$ 突加阶跃扰动时, 本文提出的控制方法也展现出和滑模控制器一样良好的抗干扰性能. 从图20控制输入曲线

中可以看出两种方法在阶跃响应初始时刻由于参考信号导数的值较大,控制占空比都达到限幅值,且在稳态时本文提出的基于扩张状态观测器的滑模控制方法的控制量波动小于滑模控制方法.以上实验结果与仿真结果一致.

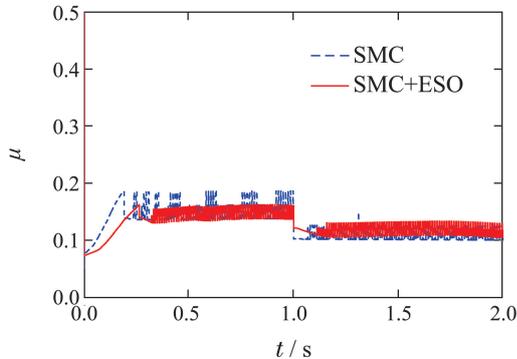


图 20 控制输入

Fig. 20 Control inputs

5 结论(Conclusions)

本文针对油量执行器系统中位置角度跟踪控制问题,考虑到系统存在的非线性和不确定性,提出了基于扩张状态观测器的滑模控制方法并设计了位置跟踪控制器.通过对油量执行器的工作原理和机电模型进行分析,建立了用于控制器设计的二阶非线性油量执行器数学模型.根据数学模型设计了扩张状态观测器来观测系统集总干扰.文章还引入干扰补偿项,最终形成了复合滑模控制律并分析了系统的稳定性,在保持滑模控制器标称性能的前提下有效地减小了滑模控制的抖振.最后,通过仿真和dSPACE平台实验对比了本文所提基于扩张状态观测器的滑模控制器与滑模控制器的控制效果,验证了该控制器的性能.

参考文献(References):

- [1] EISELE H. Electronic control of diesel passenger cars [J]. *SAE Technical Paper*, 800167.
- [2] BAUER H. *Diesel-Engine Management* [M]. Stuttgart: John Wiley and Sons, 2004, Vol.3.
- [3] MOLLENHAUE K, TSCHÖKE H. *Handbook of Diesel Engines* [M]. Berlin: Springer Science and Business Media, 2010.
- [4] TRENNE M U, IVES A P. Closed loop design for electronic diesel injection system [J]. *SAE Technical Paper*, 820447.
- [5] YANG M, SORENSON S C. Survey of the electronic injection and control of diesel engines [J]. *SAE Technical Paper*, 940378.
- [6] MA Y, XU F. Application of discrete tracking differentiator to electronic control system of diesel engine [C] // *International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*. Wuhan: IEEE, 2011, 4: 3005 – 3008.
- [7] LI Y, GAO W, ZHOU X. The adaptive fuzzy control of electromagnetic actuator in diesel fuel injection system [C] // *IEEE International Conference on Vehicle Electronics*. Changchun: IEEE, 1999, 9: 149 – 152.
- [8] LI Y, LIU G, ZHOU X. Fuel-injection control system design and experiments of a diesel engine [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(4): 565 – 570.
- [9] UTKIN V. Variable structure systems with sliding modes [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1977, 22(2): 212 – 222.
- [10] WANG J, LI S, YANG J, et al. Extended state observer-based sliding mode control for PWM-based DC-DC buck power converter systems with mismatched disturbances [J]. *IET Control Theory and Applications*, 2015, 9(4): 579 – 586.
- [11] PAN Y, OZGUNER U, DAGCI O H. Variable-structure control of electronic throttle valve [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(11): 3899 – 3907.
- [12] LI S, ZHOU M, YU X. Design and implementation of terminal sliding mode control method for PMSM speed regulation system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(4): 1879 – 1891.
- [13] LI S, YANG J, CHEN W H, et al. *Disturbance Observer-Based Control: Methods and Applications* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [14] LI S, YANG J, CHEN W H, et al. Generalized extended state observer based control for systems with mismatched uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(12): 4792 – 4802.
- [15] GUO B Z, ZHAO Z L. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty [J]. *Systems & Control Letters*, 2011, 60(6): 420 – 430.
- [16] HAN Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique—the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
(韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.)
- [17] LIU H, LI S. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 1171 – 1183.
- [18] SUN Zhenxing, LI Shihua, ZHANG Xinghua. Direct torque control of induction motor based on extended state observer and finite time control scheme [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(6): 748 – 756.
(孙振兴, 李世华, 张兴华. 基于扩张状态观测器和有限时间控制的感应电机直接转矩控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(6): 748 – 756.)
- [19] YAO J, JIAO Z, MA D. Extended-state-observer-based output feedback nonlinear robust control of hydraulic systems with backstepping [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(11): 6285 – 6293.
- [20] XUE W, BAI W, YANG S, et al. ADRC with adaptive extended state observer and its application to air-fuel ratio control in gasoline engines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5847 – 5857.
- [21] ZHU Z, XU D, LIU J, et al. Missile guidance law based on extended state observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(12): 5882 – 5891.
- [22] LAI Aifang, GUO Yu, ZHENG Lijun. Active disturbance rejection control for spacecraft attitude maneuver and stability [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 401 – 406.
(赖爱芳, 郭毓, 郑立君. 航天器姿态机动及稳定的自抗扰控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 401 – 406.)
- [23] SHI X, CHANG S. Extended state observer-based time-optimal control for fast and precise point-to-point motions driven by a novel electromagnetic linear actuator [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(4): 445 – 451.
- [24] KHALIL H K. *Nonlinear Systems* [M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

作者简介:

孙昊 (1993–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为汽车电子系统中非线性控制理论与应用, E-mail: sun_hao@seu.edu.cn;

李世华 (1975–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为非线性系统控制、机电系统建模、分析与控制, E-mail: lsh@seu.edu.cn.